# 妊娠后期营养限制对母羊胃肠道葡萄糖转运载体相关基因表达的影响

吴 建[1,2] 李小鹏[1,2] 贺志雄[1] 焦金真[1] 谭支良[1*]

(1.中国科学院亚热带农业生态研究所，亚热带农业生态过程重点实验室，湖南省畜禽健康养殖工程技术中心，农业部中南动物营养与饲料科学观测实验站，长沙 410125；2.中国科学院大学，北京 100049)

摘 要：本研究旨在研究妊娠后期营养限制对母羊胃肠道葡萄糖转运载体相关基因表达的影响。选取 20 只同期受孕的湘东黑山羊，随机分为 2 组，即对照组（自由采食）和限饲组（40%采食量限制），每组 10 只。预试期 15 d（妊娠 81~95 d），正试期 39 d（妊娠 96~135 d）。正试期结束后，屠宰并采取瘤胃、十二指肠、空肠、回肠以及盲肠的黏膜样品，利用实时定量 PCR 技术，检测 $Na^+$-葡萄糖共转运载体 1(*SGLT*1)、$Na^+$-葡萄糖共转运载体 3(*SGLT*3)、易化葡萄糖转运载体 2(*GLUT*2)和易化葡萄糖转运载体 5(*GLUT*5)基因表达量。结果表明：限饲组与对照组相比，*SGLT*1 基因表达量在瘤胃显著降低($P<0.05$)，在空肠和回肠中有降低趋势($0.05\leq P<0.10$);*GLUT*5 基因表达量在盲肠显著降低($P<0.05$)；而其他葡萄糖转运载体胃肠道基因表达量在限饲组和对照组差异均不显著($P>0.05$)。由此可见，母羊妊娠后期营养限制对胃肠道中葡萄糖转运载体基因表达有不同程度的影响，进而引起母羊机体内葡萄糖转运的改变。

关键词：妊娠后期；营养限制；山羊；葡萄糖转运载体

中图分类号：S826

碳水化合物是动物维持生长代谢和生产性能不可或缺的营养物质。反刍动物拥有与单胃动物截然不同的复胃生理结构，其体内碳水化合物的利用方式主要分为以下 2 种：一是碳水化合物在瘤胃内被微生物发酵代谢形成挥发性脂肪酸(volatile fatty acid,VFA)，从而被瘤胃上皮细胞吸收利用；二是碳水化合物在肠道内被降解为小分子的葡萄糖等单糖被肠道上皮细胞

---

收稿日期：2016-08-24

基金项目：中科院外籍青年科学家计划（2013Y2GA0010）；国家自然科学基金（31402105）

作者简介：吴 建（1991-），男，河北邯郸人，硕士研究生，从事动物营养与饲料学研究。E-mail： ibelieveyoucanfly@163.com

*通信作者：谭支良，研究员，博士生导师，E-mail: zltan@isa.ac.cn

吸收利用[1]。葡萄糖对于反刍动物具有重要的生理功能，是机体主要的供能物质，是合成乳糖的前体物质。因此，葡萄糖在胃肠道中的吸收转运对于维持反刍动物健康，保证生产性能具有重要的意义。相关研究表明，在皱胃中注射葡萄糖或者淀粉可以使葡萄糖转运载体的活性迅速增加[2]。如果长时间的营养限制，动物体内的葡萄糖转运载体表达将做出相应的调整，从而使机体来适应这种低营养状态[3]。然而，目前已有的研究并不能很好地解释反刍动物在营养限制条件下对机体葡萄糖转运的变化。同时，由于我国草原畜牧业受季节性影响严重，放牧家畜从枯草期到返青期失重高达 30%[4]。特别是在枯草期，家畜将会受到较严重的低营养水平的限制，这就必然会引起反刍动物在该时期的营养失衡和生产性能的降低[5]。反刍动物的营养代谢紊乱是造成生产性能下降的主要原因，在低营养条件下，对母羊妊娠后期的影响尤为严重，但是这方面的生产实践较多，研究营养对胃肠道葡萄糖转运载体的影响极少。因此，本研究针对在营养物质水平限制条件下，研究妊娠后期浏阳黑山羊胃肠道葡萄糖转运载体基因表达的变化，以期为妊娠期山羊科学合理的饲喂和管理提供一定的理论依据。

## 1　材料与方法

饲养试验于2015年1—6月在中国科学院亚热带农业生态研究所浏阳黑山羊营养代谢技术创新试验基地进行。

### 1.1　试验动物

试验动物均有创新试验基地提供。选择年龄相似[(2.0±0.3)岁]、第 2 胎次、体况良好、体重相近[(25.0±1.0) kg]、发情期相近的湘东黑山羊母羊 60 只。采取同期发情、人工授精和 B 超检查技术保证母羊同期受孕。从妊娠母羊中选取 20 只怀有 1 胎的作为试验对象。

### 1.2　试验设计

采用单因素随机分组试验设计。于妊娠 81　d 将选取的 20 只试验母羊随机分配到 2 组：对照组（自由采食）(control group,CG)、限饲组(40%采食量限制)(restricted group,RG)，每组 10 只。预试期 15 d（妊娠 81~95 d），用于适应新环境，期间记录日采食量；正试期为 39 d(妊娠 96~135 d)。

### 1.3　饲养管理

妊娠 0~80 d，将全部用于试验的母羊集中饲养，自由放牧。

妊娠 81~95 d 将选取的母羊饲养在通风良好、温度和湿度适宜的单栏畜舍内，记录母羊

编号，适应新环境 15 d。饲喂精粗比为 60:40 的饲粮，饲粮组成及营养水平见表 1，其中粗料为浏阳当地山上的新鲜芒草，粉碎后饲喂。母羊每天在 08：30 和 17：00 饲喂，自由饮水。饲喂量随着母羊妊娠日龄的增加而逐步增加，每 7 d 调整 1 次。调整增加量以对照组自由采食量为基础，但限饲组第 1 周饲喂量为限饲组适应期的采食量的 60%。

表 1　饲粮组成及营养水平（干物质基础）

Table1　Composition and nutrient levels of the diet (DM basis)　　%

| 项目 Items | 含量 Content |
|---|---|
| 原料 Ingredients | |
| 芒草 Miscanthus | 40.000 |
| 玉米 Corn | 40.200 |
| 豆粕 Soybean meal | 12.390 |
| 脂肪粉 Fat powder | 4.800 |
| 碳酸氢钙 $CaHPO_4$ | 0.558 |
| 碳酸钙 $CaCO_3$ | 0.552 |
| 食盐 NaCl | 0.270 |
| 预混料 Premix[1)] | 1.200 |
| 合计 Total | 100.000 |
| 营养水平 Nutrient levels[2)] | |
| 代谢能 ME/(MJ/kg) | 12.04 |
| 粗蛋白质 CP | 12.63 |
| 钙 Ca | 0.593 |
| 磷 P | 0.277 |

[1)]每千克预混料含量有 One kg of premix provided the following：$MgSO_4·H_2O$ 119.0 g，$FeSO_4·7H_2O$ 2.5 g，$CuSO_4·5H_2O$ 0.8 g，$MnSO_4·H_2O$ 3.0 g，$ZnSO_4·H_2O$ 5.0 g，$Na_2SeO_3$ 10.0 mg，KI 40.0 mg，$CoCl_2·6H_2O$ 30.0 mg，VA 95 000 IU,VD 17 500 IU,VE 18 000 IU。

[2)] 代谢能为计算值，其余均为测定值。ME was a calculated value, while the others were measured values.

### 1.4　样品采集及相关指标的测定

正试期结束后，屠宰采样。每组随机挑选 6 只母羊进行屠宰，采取颈动脉放血法，待动物停止呼吸后解剖采样。分别采取母羊瘤胃、十二指肠、空肠、回肠、盲肠这 5 个部位的组织样品，用生理盐水冲洗干净，然后用载玻片将黏膜刮下来，迅速用灭菌过的锡箔纸将黏膜包裹放入液氮保存。待屠宰试验结束后，样品放入-80 ℃冰箱冻存，以备后续检测使用。

检测葡萄糖转运载体相关基因的表达量，第 1 类是 $Na^+$-葡萄糖共转运载体(*SGLTs*)基因，包括 $Na^+$-葡萄糖共转运载体 1(sodium/glucose cotransporter member 1,*SGLT*1)和 $Na^+$-葡萄糖共

转运载体 3(sodium/glucose cotransporter member 3,*SGLT*3)，第 2 类是易化葡萄糖转运载体(*GLUTs*)基因，包括易化葡萄糖转运载体 2(facilitated glucose transporter member2,*GLUT*2)和易化葡萄糖转运载体 5(facilitated glucose transporter member5,*GLUT*5)。

1.5　样品分析

1.5.1　主要仪器

常规手术器械(手术刀、手术剪、手术镊子等)，高压灭菌锅(Tomy SX-500,日本),超净工作台(SW-CJ-IFD，苏净集团安泰空气技术有限公司)，日立冷冻超速离心机(Hitachi CR22G Ⅱ，日本)，中央纯水系统(ELAG LAB Water CENTRA200,英国)，超微量紫外分光光度计(NnaoDro ND2000,美国)，实时定量 PCR 仪(Roche Light Cycler 480 Ⅱ，瑞士),凝胶成像系统(Ultro-Violet，英国)，电泳仪(ECP3000,北京市六一仪器厂)，电泳槽(DYCP-34A，北京市六一仪器厂)。

1.5.2　主要试剂

0.9%生理盐水，氯仿，异丙醇，焦碳酸二乙酯（DEPC）水，75%乙醇(DEPC 水配制)，RNAios Plus(9109，日本 TaKaRa,),反转录试剂盒 PrimeScript™ RT reagent Kit with gDNA Eraser(RR047A，日本 TaKaRa),Premix Taq™(Ex Taq™ version 2.0 plus dye)(RR902A，日本 TaKaRa),SYBR® Premix Ex Taq™ Ⅱ(RR802A，日本 TaKaRa),溴化乙锭(ethidium bromide,EB),50×TAE(ST716，碧云天生物技术有限公司)，琼脂糖(GelPilot LE Agarose D40724,德国 QIAGEN)。

1.5.3　总 RNA 的提取及反转录

使用 RNAios Plus 试剂提取总 RNA，并且使用超微量紫外分光光度计测定总 RNA 的纯度和浓度。$OD_{260\ nm}/OD_{280\ nm}$ 在 1.8~2.2 的总 RNA 纯度较好。将纯度较好的总 RNA 经 1%的琼脂糖凝胶电泳后，以 28S rRNA 和 18S rRNA 的灰度值比 2:1 为依据，评判提取 RNA 的质量。

使用反转录试剂盒对提取的总 RNA 进行反转录合成 cDNA。

1.5.4　实时定量 PCR

根据 Genbank 上的山羊的相关基因序列，以 Primer premier 5.0 软件设计葡萄糖转运载体相关基因(*SGLT*1、*SGLT*3、*GLUT*2、*GLUT*5)的引物,并选取甘油醛-3-磷酸脱氢酶（*GAPDH*）

作为内参基因。用 Blast(http://www.ncbi.nlm.nih.gov/tools/primer-blast/index.cgi?LINK_LOC=BlastHome)工具进行引物特异性分析。本研究所用引物均由上海生工工程技术服务有限公司合成，引物序列见表 2。

表 2　葡萄糖转运载体相关引物序列

Table 2　Primers sequence used for PCR of glucose transporters

| 基因 Genes | 引物序列 Primer sequences（5′-3′） | 产物长度 Product length/bp |
|---|---|---|
| $Na^+$-葡萄糖共转运载体 1 *SGLT*1 | 上游:TGAACATCAACGGCATCATT<br>下游:ACTCCAGCCTCCACAAACAC | 104 |
| $Na^+$-葡萄糖共转运载体 3 *SGLT*3 | 上游:ACGACTTGTTCTGCGGTTTG<br>下游:ACGACTTGTTCTGCGGTTTG | 130 |
| 易化葡萄糖转运载体 2 *GLUT*2 | 上游:TGTTTCACTGGATGACGGAAT<br>下游:AGCCCAAGAGACTGGTGTTG | 100 |
| 易化葡萄糖转运载体 5 *GLUT*5 | 上游:TATGTCAGCATCGCCTGTGT<br>下游:TGAAGTTGGAGAGCCAGTGA | 154 |
| 甘油醛-3-磷酸脱氢酶 *GAPDH* | 上游:TTCCACGGCACAGTCAAG<br>下游:TACTCAGCACCAGCATCACC | 116 |

10 μL 的实时定量 PCR 反应体系包括：5.0 μL SYBR® Premix Ex Taq™ Ⅱ,0.2 μL 上游引物(10 μmol/L),0.2 μL 下游引物(10 μmol/L),3.6 μL RNase Free $dH_2O$ 和 1.0 μL cDNA。反应程序：95 ℃ 5 s 变性，60 ℃ 30 s 延伸，共 40 个循环；溶解程序，95 ℃ 15 s，60 ℃ 15 s，95 ℃ 5 s。

## 1.6　数据处理与分析

实时定量 PCR 数据采用 $2^{-\triangle\triangle Ct}$ 法[6]对基因表达进行相对定量。所有数据采用 SPSS 20.0 软件进行独立样本 *t* 检验法(*t*-test)验证差异显著性，其中 $P<0.05$ 表示组间差异显著，$0.05\leqslant P<0.10$ 表示有降低或者升高的趋势。结果采用平均值±标准误表示。

# 2　结　果

## 2.1　妊娠后期营养限制对母羊胃肠道中 *SGLT*s 基因表达的影响

由表 3 可知，与对照组相比，母羊妊娠后期在营养限制条件下盲肠中的 *SGLT*1 基因表

达量显著降低(*P*<0.05)；而瘤胃、十二指肠、空肠和回肠中 *SGLT*1 基因表达量差异均不显著(*P*>0.05)，但是在空肠和回肠中 *SGLT*1 基因表达量则有降低趋势(0.05≤*P*<0.10)，较对照组分别降低了 54.5%和 63.7%。

表 3　妊娠后期营养限制对母羊胃肠道中 *SGLT*1 基因表达量的影响

Table 3　Effect of nutritional restriction during late gestation on expression level of *SGLT*1 gene in gastrointestinal tract of ewes

| 项目 Items | 对照组 CG | 限饲组 RG | *P* 值 *P*-value |
|---|---|---|---|
| 瘤胃 Rumen | 1.11±0.33 | 1.50±0.42 | 0.516 |
| 十二指肠 Duodenum | 4.07±0.99 | 3.76±0.43 | 0.755 |
| 空肠 Jejunum | 2.64±0.68 | 1.20±0.17 | 0.068 |
| 回肠 Ileum | 5.68±1.70 | 2.06±0.76 | 0.094 |
| 盲肠 Cecum | 0.80±0.11 | 0.39±0.06 | 0.012 |

0.05≤*P*<0.10：有差异趋势；*P*<0.05：差异显著。下表同。

0.05≤*P*<0.10: tendency of difference; *P*<0.05: significant difference. The same as below.

由表 4 可知，与对照组相比，母羊妊娠后期在营养限制条件下 *SGLT*3 基因在胃肠道不同部位的表达量变化均不显著(*P*>0.05)。

表 4　妊娠后期营养限制对母羊胃肠道中 *SGLT*3 基因表达量的影响

Table 4　Effect of nutritional restriction during late gestation on expression level of *SGLT*3 gene in gastrointestinal tract of ewes

| 项目 Items | 对照组 CG | 限饲组 RG | *P* 值 *P*-value |
|---|---|---|---|
| 瘤胃 Rumen | 1.12±0.38 | 0.85±0.35 | 0.631 |
| 十二指肠 Duodenum | 3.47±1.50 | 4.36±1.10 | 0.647 |
| 空肠 Jejunum | 4.57±2.10 | 3.15±0.65 | 0.494 |
| 回肠 Ileum | 0.98±0.31 | 1.05±0.41 | 0.899 |
| 盲肠 Cecum | 3.37±3.08 | 0.48±0.33 | 0.254 |

2.1　妊娠后期营养限制对母羊胃肠道中 *GLUT*s 基因表达的影响

由表 5 可知，与对照组相比，母羊妊娠后期在营养限制条件下 *GLUT*2 基因表达量在瘤胃、十二指肠、空肠、回肠和盲肠中差异均不显著(*P*>0.05)，但在十二指肠略有升高，较对照组提高了 41.6%。

表 5　妊娠后期营养限制对母羊胃肠道中 *GLUT*2 基因表达量的影响

Table 5　Effect of nutritional restriction during late gestation on expression level of *GLUT*2 gene in gastrointestinal tract of ewes

| 项目 Items | 对照组 CG | 限饲组 RG | *P* 值 *P*-value |
|---|---|---|---|
| 瘤胃 Rumen | 1.00±0.06 | 1.20±0.48 | 0.740 |
| 十二指肠 Duodenum | 8.90±1.70 | 12.60±1.10 | 0.118 |
| 空肠 Jejunum | 2.28±1.24 | 2.13±0.37 | 0.903 |
| 回肠 Ileum | 1.44±0.50 | 0.75±0.25 | 0.237 |
| 盲肠 Cecum | 3.49±3.13 | 1.72±1.00 | 0.528 |

由表 6 可知，与对照组相比，母羊妊娠后期在营养限制条件下 *GLUT*5 基因表达量在盲肠中显著降低($P<0.05$)，但在瘤胃、十二指肠、空肠和回肠中变化不显著($P>0.05$)。

表 6　妊娠后期营养限制对母羊胃肠道中 *GLUT*5 基因表达量的影响

Table 6　Effect of nutritional restriction during late gestation on expression level of *GLUT*5 gene in gastrointestinal tract of ewes

| 项目 Items | 对照组 CG | 限饲组 RG | *P* 值 *P*-value |
|---|---|---|---|
| 瘤胃 Rumen | 1.22±0.54 | 0.68±0.31 | 0.397 |
| 十二指肠 Duodenum | 37.09±3.30 | 22.44±6.57 | 0.137 |
| 空肠 Jejunum | 4.59±2.13 | 5.23±1.72 | 0.823 |
| 回肠 Ileum | 1.89±0.80 | 1.00±0.30 | 0.304 |
| 盲肠 Cecum | 3.41±0.80 | 0.71±0.17 | 0.005 |

## 3　讨　论

根据葡萄糖转运载体转运方式的不同，可分为 2 个家族：SGLTs 家族和 GLUTs 家族[7]。SGLTs 主要在细胞膜的顶端表达，可以转运葡萄糖和半乳糖[8]。而 GLUTs 大部分在细胞膜的基底侧表达，可以转运果糖，并且当葡萄糖浓度较低时 GLUTs 能够通过负反馈调节机体葡萄糖的平衡[9]。总之，葡萄糖转运载体在动物的生长发育和机体葡萄糖吸收转运中发挥重要作用。

### 3.1　SGLTs 家族

据研究表明，无论是蔗糖还是淀粉分解得到的葡萄糖主要是通过 SGLT1 进入肠腔上皮细胞[10-11]，而 *SGLT*1 基因在转录和翻译水平的表达量受采食量和昼夜节律的调节[12]。哺乳动物在刚出生后未断奶这个阶段中，*SGLT*1 基因在肠道中的表达较强，对己糖的摄取能力强。断奶后，*SGLT*1 基因的表达量明显减少，对己糖的吸收也减少[7]。Bauer 等[13]试验研究发现，灌注 α-葡萄糖可以使牛和绵羊空肠中的 SGLT1 活性显著提高，从而显著提高了葡萄糖的吸收效率。也有研究揭示了营养限制仔猪采食量会使得 *SGLT*1 和 *GLUT*2 的基因表达量降低[14]。本研究结果显示，与对照组相比，限饲组母羊 *SGLT*1 基因的表达量在空肠和回肠中均有降低趋势，并且 *SGLT*1 基因的表达量在盲肠中显著降低。这一结果可能是由于母羊

妊娠后期营养限制造成胃肠道内葡萄糖浓度有所降低，从而引起胃肠道中 *SGLT*1 基因表达量的降低，以此满足母羊机体正常需求并避免不必要的体内能量损失和饲粮营养物质的浪费。

在人类医学研究中表明，SGLT3 可引起 $Na^+$电流变化，但不参与葡萄糖的转运[15]。而在动物模型中，如小鼠，SGLT3 有 2 个亚型基因组成，包括 mSGLT3a 和 mSGLT3b，目前为止 mSGLT3a 功能尚不明确，而有研究已证实 mSGLT3b 可以引起 $Na^+$电流变化，但其不转运葡萄糖[16]。由此可知，*SGLT*3 基因编码的蛋白有可能是感应体，而非转运载体[12]。本研究结果指出，母羊妊娠后期在营养限制条件下，*SGLT*3 基因表达量在十二指肠升高了 25.6%，但在后肠道部位没有升高。这一结果也可能是由于食糜从皱胃中流出，经过的第 1 段肠道即为十二指肠，SGLT3 作为感应体可第一时间感应到胃肠道内葡萄糖的变化，从而引起了其表达量升高。同时也意味着通过判断 *SGLT*3 基因表达量的变化，机体可以更加精确地感应食糜中的葡萄糖含量，调控机体后肠道部分葡萄糖转运载体和葡萄糖代谢的变化，以避免机体能量不必要的消耗和饲粮中营养成分的丢失。

3.2　GLUTs 家族

有研究指出 SGLT1 和 GLUT2 不仅是葡萄糖转运载体，也可能是葡萄糖感应受体，它可刺激并引起胃肠激素的分泌[17-20]。当人造糖精刺激刷状缘膜时，可以通过提高 *GLUT*2 基因的表达量来增加葡萄糖的吸收效率[20]。本研究中 *GLUT2* 基因表达量未受营养限制的影响，且其在十二指肠中的表达量最高。与本研究结果相似，Yoshikawa 等[11]的研究结果也表明，胃肠道前段（瘤胃和十二指肠）是 GLUT2 发挥作用的主要场所。另外，有研究指出当刷状膜缘 SGLT1 活性达到饱和时，GLUT2 能短暂的移动到顶端以节约能量，从而缓解因 SGLT1 活性变化而产生的 $Na^+$梯度的降低[12]。故本研究结果显示了，营养限制可能引起胃肠道后段（空肠、回肠和盲肠）内葡萄糖浓度降低，从而造成其上皮细胞中 SGLT1 活性未达到饱和状态，进而使胃肠道后段中 GLUT2 基因表达量有所降低。

在细胞模型中，如肠道上皮 L 型细胞系，在果糖刺激条件下，*GLUT*5 基因的表达量较高[21]，揭示了果糖在肠道中吸收转运可能是通过 GLUT5 进行的。这在动物模型进一步得到证实，如敲除 *GLUT*5 基因的小鼠无法吸收果糖，说明果糖的吸收转运必须通过 GLUT5[22]。鉴于 *GLUT*5 基因表达量的升高预示着果糖转运能力的提升，本研究的结果其在十二指肠中表达量最高，可以推断 GLUT5 转运果糖的主要场所是十二指肠。同时，本研究结果也揭示

了，即使营养水平受到限制，*GLUT*5 基因在前段肠道中表达量依然较高，故导致 *GLUT*5 基因在盲肠中的表达量显著降低。总之，母羊妊娠后期营养限制将对胃肠道葡萄糖转运载体产生不同程度的影响，故我们可以结合实际生产需求调配最佳的饲粮配方，从而提高其生产性能。

## 4 结　论

母羊妊娠后期营养限制对胃肠道中葡萄糖转运载体基因表达有不同程度的影响，进而引起母羊机体内葡萄糖转运的改变。

参考文献：


[1] 张霞.日粮不同营养水平对绒山羊机体代谢及肠道营养物质感应的影响[D].硕士学位论文.呼和浩特:内蒙古农业大学,2014.

[2] 张航,刘强,王聪,等.2-甲基丁酸对犊牛小肠酶活及葡萄糖转运载体基因表达的影响[J].中国农业科学,2016,49(5):979–987.

[3] 徐庆,田科雄.反刍动物葡萄糖代谢研究进展[J].饲料博览,2009(8):17–20.

[4] 刘小刚,李大彪,侯先志,等.营养限制及补偿对羔羊小肠黏膜生长发育的影响[J].中国农业科学,2011,44(17):3613–3621.

[5] 吴端钦,贺志雄,汤少勋,等.母羊妊娠后期营养限制对羔羊肉质及相关基因表达量的影响[J].生命科学研究,2013,17(2):151–155.

[6] SCHMITTGEN T D,LIVAK K J.Analyzing real-time PCR data by the comparative $C_T$ method[J].Nature Protocols,2008,3(6):1101–1108.

[7] 何莞嫣,粟灵皓,宋卓,等.肠道葡萄糖转运体的研究进展[J].湖南农业科学,2013(7):8–11.

[8] KELLETT G L,BROT-LAROCHE E,MACE O J,et al.Sugar absorption in the intestine:the role of GLUT2[J].Annual Review of Nutrition,2008,28:35–54.

[9] KALSI K K,BAKER E O,FRASER O,et al.Glucose homeostasis across human airway epithelial cell monolayers:role of diffusion,transport and metabolism[J].Pflügers Archiv:European Journal of Physiology,2008,457(5):1061–1070.

[10] WRIGHT E M,LOO D D F,HIRAYAMA B A.Biology of human sodium glucose transporters[J].Physiological Reviews,2011,91(2):733–794.

[11] YOSHIKAWA T,INOUE R,MATSUMOTO M,et al.Comparative expression of hexose transporters (SGLT1,GLUT1,GLUT2 and GLUT5) throughout the mouse gastrointestinal tract[J].Histochemistry and Cell Biology,2011,135(2):183–194.

[12] TOLHURST G,REIMANN F,GRIBBLE F M.Intestinal sensing of nutrients[J].Handbook of Experimental Pharmacology,2012,209:309–335.

[13] BAUER M L,HARMON D L,MCLEOD K R,et al.Adaptation to small intestinal starch assimilation and glucose transport in ruminants[J].Journal of Animal Science,1995,73(6):1828–1838.

[14] LIU J,LIU Z,GAO L,et al.Nutrient-intake-level-dependent regulation of intestinal development in newborn intrauterine growth-restricted piglets via glucagon-like peptide-2[J].Animal,2016,10(10):1645–1654.

[15] DÍEZ-SAMPEDRO A,HIRAYAMA B A,OSSWALD C,et al.A glucose sensor hiding in a family of transporters[J].Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America,2003,100(20):11753–11758.

[16] DÍEZ-SAMPEDRO A,BARCELONA S.Sugar binding residue affects apparent $Na^+$ affinity and transport stoichiometry in mouse sodium/glucose cotransporter type 3B[J].Journal of Biological Chemistry,2011,286(10):7975–7982.

[17] KELLETT G L.Comment on:Gorboulev et al.$Na^+$-D-glucose cotransporter SGLT1 Is pivotal for intestinal glucose absorption and glucose-dependent incretin secretion.Diabetes 2012;61:187–196[J].Diabetes,2012,61(6):e4.

[18] MORIYA R,SHIRAKURA T,ITO J,et al.Activation of sodium-glucose cotransporter 1 ameliorates hyperglycemia by mediating incretin secretion in mice[J].American Journal of Physiology:Endocrinology and Metabolism,2009,297(6):E1358-E1365.

[19] CANI P D,HOLST J J,DRUCKER D J, et al.GLUT2 and the incretin receptors are involved in glucose-induced incretin secretion[J].Molecular and Cellular Endocrinology,2007,276(1/2):18–23.

[20] MACE O J,SCHINDLER M,PATEL S.The regulation of K-and L-cell activity by GLUT2 and the calcium-sensing receptor CasR in rat small intestine[J].The Journal of Physiology,2012,590(12):2917–2936.

[21] REIMANN F,HABIB A M,TOLHURST G,et al.Glucose sensing in L cells:a primary cell study[J].Cell Metabolism,2009,8(6):532–539.

[22] BARONE S,SINGH A K,ZUO J,et al.Slc2a5 (GLUT5) is essential for the absorption of fructose in the intestine and generation of fructose-induced hypertension[J].The Journal of Biological Chemistry,2009,284:5056–5066.

Effects of Nutritional Restriction during Late Gestation on Gene Expressions of Glucose Transporters in Gastrointestinal Tract of Ewes

WU Jian[1,2] LI Xiaopeng[1,2] HE Zhixiong[1] JIAO Jinzhen[1] TAN Zhiliang[1*]

(1. *Key Laboratory for Agro-Ecological Processes in Subtropical Region, Hunan Provincial Engineering Research Center for Healthy Livestock and Poultry Production, South-Central Experimental Station of Animal Nutrition and Feed Science in Ministry of Agriculture, Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Changsha* 410125, *China*; 2. *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049, *China*)

Abstract: This experiment was conducted to investigate the effects of nutritional restriction during late gestation on gene expressions of glucose transporters in gastrointestinal tract of ewes. Twenty *Xiangdong* black pregnant goats were chose and randomly assigned to 2 groups： control group (*ad libtum*) and restricted group (40% restriction of feed intake), and each group had 10 ewes. The pre-trial lasted for 15 d (81 to 95 d of gestation), and the trial lasted for 39 d (96 to 135 d of gestation). After the trial, ewes were slaughtered to collected mucosa samples of rumen, duodenum, jejunum, ileum and cecum. Real-time PCR analysis was used to determine the expression levels of sodium/glucose cotransporter member 1 (*SGLT*1) gene, sodium/glucose cotransporter member 3 (*SGLT*3), facilitated glucose transporter member 2 (*GLUT*2) and facilitated glucose transporter member 5 (*GLUT*5). The results showed as follows: compared with

*Corresponding author, professor, E-mail: zltan@isa.ac.cn （责任编辑 王智航）

control group, the expression level of *SGLT*1 gene in rumen of restricted group was significantly decreased ($P<0.05$), and there was a decreased tendency for that in jejunum and ileum ($0.05\leq P<0.10$). The expression level of *GLUT*5 gene was significantly decreased in cecum ($P<0.05$); while the expression levels of other glucose transporter genes in gastrointestinal tracts were not significantly different between restricted group and control group ($P>0.05$). Collectively, nutritional restriction has different effects on the expressions of glucose transporter genes located on gastrointestinal tracts, thereby leading to the changes of glucose transport.

Key words: late gestation; nutritional restriction; goat; glucose transporter